

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 621.335.04:621.333

Т. М. МІЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Інтелектуальні системи електропостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. + 38 (099) 136 96 25, ел. пошта mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ МЕТОДОМ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Мета. Наукова робота передбачає розробку та обґрунтування нового методу параметричної ідентифікації пристроїв електричної тяги, що базується на системі ортогональних функцій, а саме – на основі часових степеневих рядів. **Методика.** Для розв’язання поставленої задачі використовуються: теорія степеневих рядів; основні закони теоретичної електротехніки; елементи спектрального аналізу періодичних та неперіодичних несинусоїдних функцій електричних величин напруги й струму; матричні методи розв’язання системи алгебраїчних рівнянь. **Результати.** Розроблено новий метод часових степеневих рядів, який може використовуватися для ідентифікації пристроїв як системи тягового електропостачання, так і електрорухомого складу. Метод базується на складанні інтегро-диференціальних рівнянь електромагнітного стану досліджуваної електротехнічної системи. Задані напруга і струм у зазначених рівняннях апроксимовані степеневими рядами, в які входять шукані параметри електричного кола системи у вигляді коефіцієнтів. Користуючись розробленим методом, у роботі ідентифіковано електровози змінного струму ДСЗ і 2ЕС5К. Визначено їх параметри R і L , що змінюються в часі на протязі періоду прикладеної синусоїдної напруги. Побудовано та проаналізовано часові залежності $R(t)$ і $L(t)$. Дане пояснення щодо ділянок із від’ємною індуктивністю. Показано, що зазначені електровози можуть бути ідентифіковані пасивним двополюсником із параметричними резистивним та індуктивним елементами. **Наукова новизна.** Інноваційність роботи полягає, по-перше, у розробці нового методу ідентифікації, по-друге, у можливості заміни будь-якого пристрою електричної тяги параметрами RL – двополюсника. І, нарешті, в тому, що запропонований метод дозволяє шляхом уточнення апроксимації вхідних та вихідних напруг і струмів отримувати найбільш точні значення параметрів R та L ідентифікаційного двополюсника. **Практична значимість.** Розроблений метод дозволяє оцінювати в масштабі реального часу параметри пристроїв систем електричної тяги, що сприяє його застосуванню при моделюванні перехідних електромагнітних процесів, які виникають при роботі досліджуваної системи в аварійних режимах.

Ключові слова: ідентифікація; степеневі ряди; електровоз; індуктивність; резистор; метод; напруга; струм; часові залежності

Вступ.

Постановка задачі

Суттєве складання в останні роки систем тягового електропостачання та електрорухомого складу, особливо тих, які забезпечують високошвидкісний рух поїздів, обумовлює відповідне ускладнення їх класичних математичних моделей [5]. Якраз це гальмує розробку моделей прогнозування електромагнітних та електроенергетичних процесів у системах електрич-

ної тяги. За нашою думкою, цю задачу можливо розв’язати методами ідентифікації [6].

Кількість наукових публікацій за темою методів ідентифікації, у тому числі й в останні роки, достатньо велика [1–4; 9–12; 15]. Зокрема, у [15] методами часових рядів і нечіткої логіки визначається набір споживачів, які підозрюються в крадіжках електроенергії в електричних мережах низької напруги. На основі аналізу механізму можливої перенапруги в повіт-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

рянній турбіні автори роботи [10] запропонували метод ідентифікації параметрів процесу однофазного короткого замикання. Для встановлення пошкодженого фідера при його високоомному замиканні на землю автори роботи [11] використовують параметричну ідентифікацію для визначення ємності фідер–земля.

Однак, аналіз існуючих моделей і методів ідентифікації показує, що вони розробляються без їх фізичного обґрунтування, на формально-математичному підході до досліджуваної системи. Моделі не містять «структурних» елементів, із яких складається система, бо вони в значній більшості не мають «прив'язки» до певної прикладної виробничої галузі. Крім цього, як правило, застосовуються методи пасивної ідентифікації, в яких як тестовий сигнал (процес) використовують «білий шум» або гармонічний процес. Такий підхід не застосовується до потужних громіздких систем, якими, наприклад, є системи електричної тяги. Тому виключенням із зазначених вище є робота [6], в якій запропоновано моделі і методи активної ідентифікації дуже важливої прикладної галузі, якою є система електричної тяги. При цьому автор не обмежився теоретичними викладками, а й надає відомості про практичне впровадження методів ідентифікації в діючі на залізницях України електровози ДС 3 та 2ЕС5К.

Мета

У зв'язку з вищевикладеним, метою роботи є розробка та обґрунтування нового методу параметричної ідентифікації пристроїв електричної тяги, що базується на системі ортогональних функцій, а саме, на основі часових степеневих рядів.

Методика

Розробку методу часових рядів здійснювали на основі законів теоретичної електротехніки та методів ідентифікації систем у базисі ортогональних функцій [8], а саме, методом часових степеневих рядів чи рядів Фур'є [12]. При цьому вважали, що структура системи, що ідентифікується, відома, і її можна представити параметричним пасивним двополюсником з послідовним з'єднанням резисторного $R(t)$, індуктивного $L(t)$ та ємнісного $C(t)$ елементів [3].

Тоді оператор цієї системи представляється в загальному вигляді як

$$S(t) = R(t) \dots + [\dots L(t)] + \int_0^t \frac{1 \dots}{C(t)} dt. \quad (1)$$

У розглядуваній задачі вхідною функцією до двополюсника є напруга $u(t)$, а вихідною – струм $i(t)$, тоді рівняння електромагнітного стану системи записується як

$$u(t) = R(t)i(t) + \frac{d}{dt}[i(t)L(t)] + \int_0^t \frac{i(t)}{C(t)} dt = R(t)i(t) + L(t) \frac{di(t)}{dt} + i(t) \frac{dL(t)}{dt} + \int_0^t \frac{i(t)}{C(t)} dt. \quad (2)$$

Представимо відомі функції $u(t)$ та $i(t)$, а також шукані параметри $R(t)$, $L(t)$ та $C(t)$ степеневими рядами [7]:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= \sum_{k=0}^{n_u} U_k t^k; \quad i(t) = \sum_{k=0}^{n_i} I_k t^k \\ R(t) &= \sum_{k=0}^{n_R} R_k t^k; \quad L(t) = \sum_{k=0}^{n_L} L_k t^k \\ C(t) &= \sum_{k=0}^{n_C} C_k t^k \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

де величини U_k ($k = \overline{0, n_u}$) та I_k ($k = \overline{0, n_i}$) знаходяться шляхом апроксимації функцій $u(t)$, $i(t)$, і тому вони відомі і постійні (незмінні в часі), а величини R_k ($k = \overline{0, n_R}$), L_k ($k = \overline{0, n_L}$), C_k ($k = \overline{0, n_C}$) потрібно визначити.

Далі функції (3), а також необхідні їх похідні та інтеграли підставляємо в символічне рівняння (2), у результаті отримуємо тотожність для довільного моменту часу $t \in [0, T]$. Прирівнюючи в цій тотожності коефіцієнти при однакових степенях змінної t , отримуємо систему рівнянь для визначення R_k , L_k , C_k . Виходячи з цього, ранг системи незалежних рівнянь дорівнює $n_R + n_L + n_C$, який отримується вибором величин n_u , n_i , тобто, залежить від степенів апроксимаційних поліномів функцій $u(t)$ та

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

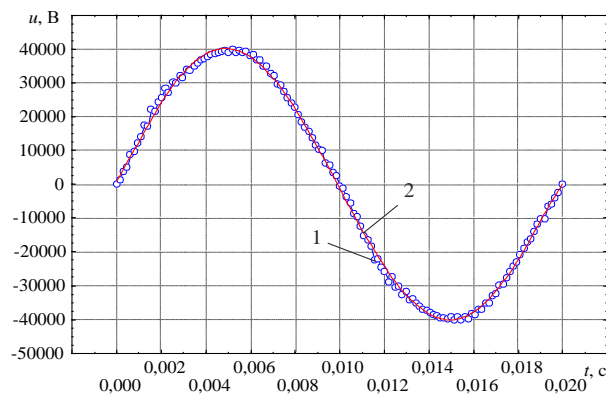
$i(t)$. Тому умовою можливості розв'язання системи рівнянь, й тим самим визначення параметрів, є виконання нерівності:

$$\{n_u, n_R \cdot n_i, n_L \cdot n_i - 1, n_C \cdot n_i + 1\} \geq n_R + n_L + n_C.$$

Окрім цього, бажаним є виконання такого обмеження за активною потужністю за певний період T :

$$\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T R(t)i^2(t)dt. \quad (4)$$

a – a



б – б

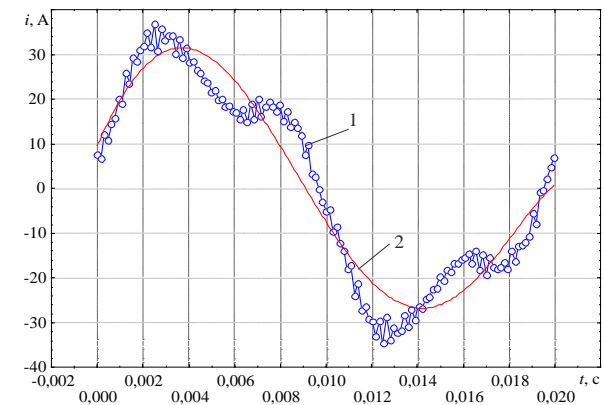
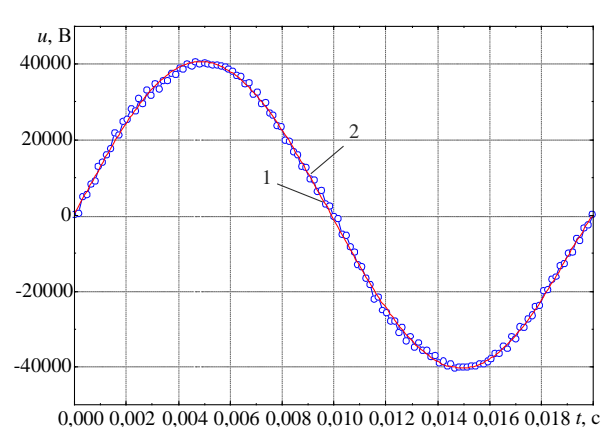


Рис. 1. Осцилограми вхідних напруги (а) і струму (б) електровоза ДС 3 при струмі навантаження $I=20$ А

Fig. 1. Oscillograms of the input voltage (a) and current (b) of the electric locomotive DS 3 at a load current $I=20$ A

a – a



б – б

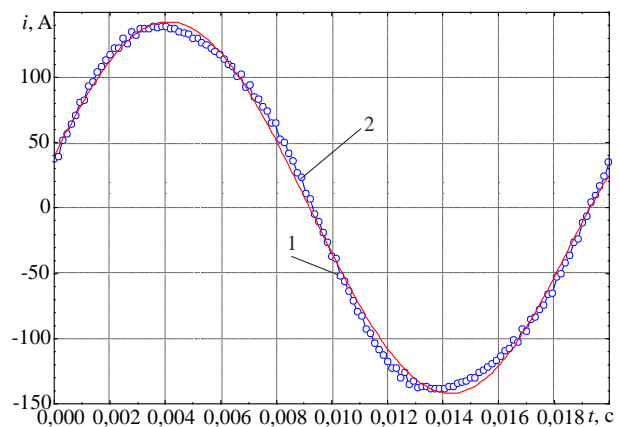


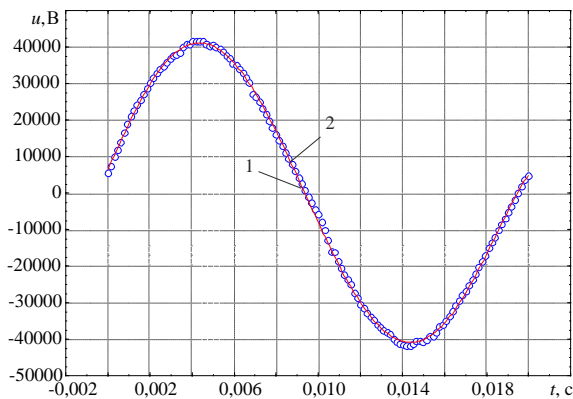
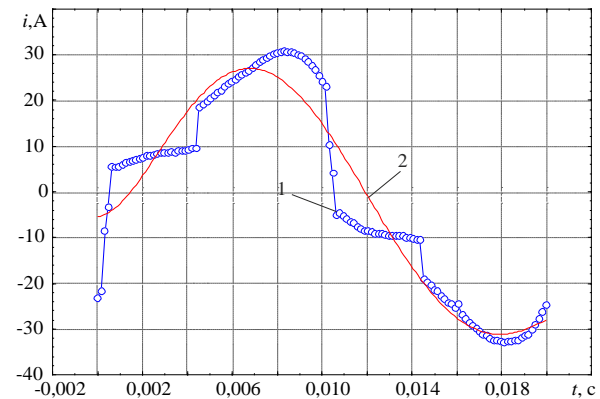
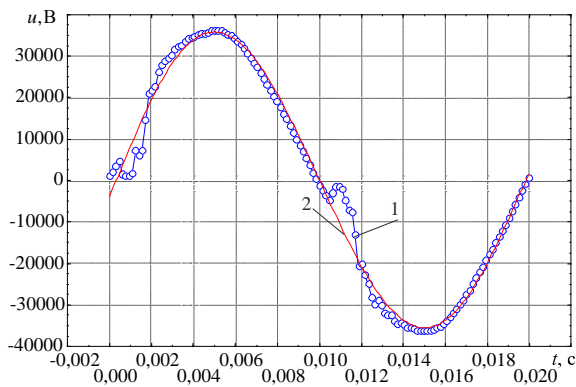
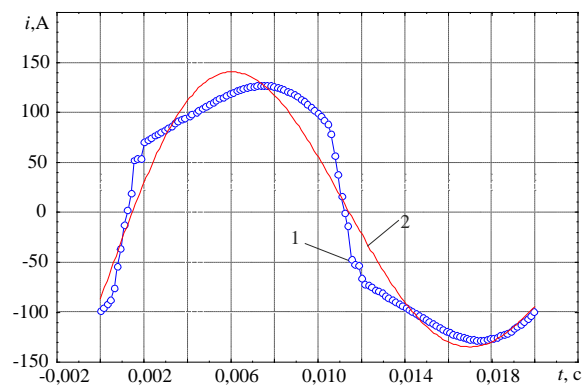
Рис. 2. Осцилограми вхідних напруги (а) і струмі (б) електровоза ДС 3 при струмі навантаження $I=100$ А

Fig. 2. Oscillograms of the input voltage (a) and current (b) of the electric locomotive DS 3 at a load current $I=100$ A

Результати

Застосуємо запропоновані вище метод і методику для ідентифікації нових електровозів змінного струму типу ДС 3 і 2ЕС5К. Для цього скористаємося осцилограмами вхідних напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ за один період $T = 0,02$ с при різних навантаженнях: при діючих значеннях струму $I = 20$ А та $I = 100$ А (рис. 1 – 4). На цих рисунках: 1 – експериментально отримана крива; 2 – апроксимуюча залежність.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

a – a*б – б*Рис. 3. Осцилограми вхідних напруги (а) і струму (б) електровоза 2ЕС5К при струмі навантаження $I=20$ АFig. 3. Oscillograms of the input voltage (a) and current (b) of the electric locomotive 2ES5K at load current $I=20$ A*a – a**б – б*Рис. 4. Осцилограми вхідних напруги (а) і струму (б) електровоза 2ЕС5К при струмі навантаження $I=100$ АFig. 4. Oscillograms of the input voltage (a) and current (b) of the electric locomotive 2ES5K at a load current $I=100$ A

При цьому електровоз замістимо пасивним $R(t) - L(t)$ -двополюсником і розглянемо два варіанти в залежності від апроксимаційних поліномів $u(t)$, $i(t)$ та прийнятих залежностей $R(t)$ і $L(t)$ [8,13].

Варіант 1: $n_u = 4$, $n_i = 4$, $n_R = 2$, $n_L = 2$, тобто:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= U_0 + U_1 \cdot t^1 + U_2 \cdot t^2 + U_3 \cdot t^3; \\ i(t) &= I_0 + I_1 \cdot t^1 + I_2 \cdot t^2 + I_3 \cdot t^3; \\ R(t) &= R_0 + R_1 t^1; \\ L(t) &= L_0 + L_1 t^1. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Після підстановки цих величин та їх похідних у рівняння (2) (без урахування останнього доданка для ємності) отримуємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= R_0 \cdot I_0 + R_1 \cdot 0 + L_0 \cdot I_1 + L_1 \cdot I_0; \\ U_1 &= R_0 \cdot I_1 + R_1 \cdot I_0 + L_0 \cdot 2I_2 + L_1 \cdot 2I_1; \\ U_2 &= R_0 \cdot I_2 + R_1 \cdot I_1 + L_0 \cdot 3I_3 + L_1 \cdot 3I_2; \\ U_3 &= R_0 \cdot I_3 + R_1 \cdot I_2 + L_0 \cdot 0 + L_1 \cdot 4I_3. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Ця система рівняння (6) є дійсною для обох електровозів і для будь-якого періоду T для змінних $u(t)$ та $i(t)$, тобто для будь-якого струму навантаження I [14]. Тому чисельно ро-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

зрахуємо коефіцієнти R_k і L_k (розв'язуючи систему (6)) у шуканих параметрах $R(t)$ і $L(t)$ для обох електровозів і при різних I .

Для електровозу ДС 3 при $I = 100$ А вхідна напруга $u(t)$ була апроксимована згідно з осцилограмою (рис. 2, а) і виразом (5) таким степеневим рядом:

$$u(t) = 726,3 + 1,18 \cdot 10^7 t + 8,47 \cdot 10^8 t^2 - 4,76 \cdot 10^{11} t^3, \text{ В,}$$

а вхідний струм $i(t)$ – теж рядом (згідно з рис. 2, б):

$$i(t) = 40,39 + 40840,66t - 1,613 \cdot 10^5 t^2 - 1,302 \cdot 10^9 t^3, \text{ А.}$$

Для цього ж електровозу, але при $I = 20$ А (згідно рис. 1) отримані поліноми:

$$u(t) = 869,55 + 1,16 \cdot 10^7 t + 8,66 \cdot 10^8 t^2 - 4,74 \cdot 10^{11} t^3, \text{ В.}$$

$$i(t) = 9,74 + 11579,84t - 1,33 \cdot 10^6 t^2 - 1,05 \cdot 10^8 t^3, \text{ А.}$$

Для електровозу 2ЕС5К відповідно маємо:
– при $I = 20$ А (згідно з осцилограмами рис. 3)

$$u(t) = 6315,6 + 1,3 \cdot 10^7 t + 5,12 \cdot 10^7 t^2 - 4,035 \cdot 10^{11} t^3 \text{ В;}$$

$$i(t) = -5,36 + 370,4t + 2,92 \cdot 10^6 t^2 - 4,9 \cdot 10^8 t^3 \text{ А.}$$

– при $I = 100$ А (згідно з осцилограмами рис. 4):

$$u(t) = -3891,2 + 1,2 \cdot 10^7 t + 5,2 \cdot 10^8 t^2 - 3,97 \cdot 10^{11} t^3 \text{ В;}$$

$$i(t) = -86,96 + 60817,55t + 8,08 \cdot 10^5 t^2 - 1,198 \cdot 10^9 t^3 \text{ А.}$$

Підставляючи в систему рівнянь (6) коефіцієнти при t в поліномах $u(t)$ та $i(t)$, і розв'язавши систему, отримаємо шукані коефіцієнти R_k і L_k у виразах параметрів $R(t)$ і $L(t)$ для цього варіанта; їх значення приведені в таблиці 1.

Варіант 2: $n_u = 6$, $n_i = 6$, $n_R = 3$, $n_L = 3$, тобто:

$$\left. \begin{aligned} u(t) &= U_0 + U_1 \cdot t^1 + U_2 \cdot t^2 + U_3 \cdot t^3 + \\ &\quad + U_4 \cdot t^4 + U_5 \cdot t^5; \\ i(t) &= I_0 + I_1 \cdot t^1 + I_2 \cdot t^2 + I_3 \cdot t^3 + \\ &\quad + I_4 \cdot t^4 + I_5 \cdot t^5; \\ R(t) &= R_0 + R_1 t^1 + R_2 t^2; \\ L(t) &= L_0 + L_1 t^1 + L_2 t^2. \end{aligned} \right\} (7)$$

Після підстановки (7) в (2) отримаємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= 9,73R_0 + 11579,8L_0 + 9,73L_1, \\ U_1 &= 11579,8R_0 + 9,73R_1 - \\ &\quad - 0,265 \cdot 10^7 L_0 + 23159,68L_1 + 19,47L_2; \\ U_2 &= -0,1323 \cdot 10^7 R_0 + 11579,84R_1 + \\ &\quad + 9,73 \cdot R_2 - 0,314 \cdot 10^9 L_0 - \\ &\quad - 0,397 \cdot 10^7 L_1 + 34739,5L_2; \\ U_3 &= -0,10489 \cdot 10^9 R_0 - 0,1324 \cdot 10^7 R_1 + \\ &\quad + 11579,84R_2 + 0,5524 \cdot 10^{11} L_0 - \\ &\quad - 0,4196 \cdot 10^9 L_1 - 0,5296 \cdot 10^7 L_2; \\ U_4 &= 0,1382 \cdot 10^{11} R_0 - 0,10489 \cdot 10^9 R_1 - \\ &\quad - 0,1324 \cdot 10^7 R_2 - 0,16898 \cdot 10^{13} L_0 + \\ &\quad + 0,69 \cdot 10^{11} L_1 - 0,5245 \cdot 10^9 L_2; \\ U_5 &= -0,33796 \cdot 10^{12} R_0 + 0,1382 \cdot 10^{11} R_1 - \\ &\quad - 0,10489 \cdot 10^9 R_2 - 0,2028 \cdot 10^{13} L_1 + \\ &\quad + 0,8287 \cdot 10^{11} L_2. \end{aligned} \right\} (8)$$

Апроксимація $u(t)$ та $i(t)$ дала такі степеневі ряди (поліноми).

Для електровозу ДС 3 відповідно маємо:
– при $I = 20$ А:

$$u(t) = 869,54 + 1,16 \cdot 10^7 t + 8,67 \cdot 10^8 t^2 - 4,74 \cdot 10^{11} t^3 \text{ В;}$$

$$i(t) = 9,734 + 11579,84t - 1,324 \cdot 10^6 t^2 - 1,0489 \cdot 10^7 t^3 \text{ А;}$$

– при $I = 100$ А:

$$u(t) = 726,3 + 1,18 \cdot 10^7 t + 8,47 \cdot 10^8 t^2 - 4,76 \cdot 10^{11} t^3 \text{ В;}$$

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

$$i(t) = 40,39 + 40840,66t - 1,613 \cdot 10^5 t^2 - 1,302 \cdot 10^9 t^3 \text{ А.}$$
 Для електровозу 2ЕС5К відповідно маємо:
 – при $I = 20 \text{ А}$:

$$u(t) = 6315,6 + 1,3 \cdot 10^7 t + 5,12 \cdot 10^7 t^2 - 4,035 \cdot 10^{11} t^3 \text{ В;}$$

$$i(t) = -5,36 + 370,4t + 2,92 \cdot 10^6 t^2 - 4,9 \cdot 10^8 t^3 \text{ А;}$$
 – при $I = 100 \text{ А}$:

$$u(t) = -3891,2 + 1,2 \cdot 10^7 t + 5,2 \cdot 10^8 t^2 - 3,97 \cdot 10^{11} t^3 \text{ В;}$$

$$i(t) = -86,96 + 60817,55t + 8,08 \cdot 10^5 t^2 - 1,198 \cdot 10^9 t^3 \text{ А.}$$

Підставляючи в систему (8) коефіцієнти при t в приведених вище поліномах $u(t)$ та $i(t)$, отримуємо шукані значення R_k і L_k – у виразах $R(t)$ і $L(t)$ для варіанта 2; значення цих параметрів приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів у виразах параметрів $R(t)$ і $L(t)$ ідентифікаційного двополюсника для електровозів ДС 3 і 2ЕС5К

Table 1

The values of the coefficients in the expressions for parameters $R(t)$ and $L(t)$ of the identification impedor for electric locomotives DS 3 and 2ES5K

Параметри	Електровоз ДС 3				Електровоз 2ЕС5К			
	Варіант 1		Варіант 2		Варіант 1		Варіант 2	
	$I = 20 \text{ А}$	$I = 100 \text{ А}$	$I = 20 \text{ А}$	$I = 100 \text{ А}$	$I = 20 \text{ А}$	$I = 100 \text{ А}$	$I = 20 \text{ А}$	$I = 100 \text{ А}$
R_0 , Ом	-167,35	309,6	-611,3	312,38	-2 116,9	51,36	-2 130,9	66,49
R_1 , Ом/с	213 153,6	-4 885,4	-471 376,7	-10 202,5	162 637,9	12 026,6	455 464,5	24 374,6
R_2 , Ом/с ²	–	–	$-0,344 \cdot 10^7$	62353,2	–	–	$0,12268 \cdot 10^7$	-92 902,6
L_0 , Гн	-0,182	-0,279	0,021	-0,282	2,37	0,12	2,5	0,104
L_1 , Гн/с	-473,75	-8,83	675,32	-9,282	10 102,56	80,36	1 125,98	75,9
L_2 , Гн/с ²	–	–	-77 136,5	1 678,95	–	–	-71 034,26	-3 867,7

На рис. 5 – 8 за даними таблиці побудовано часові залежності шуканих параметрів $R(t)$ і $L(t)$, за якими ідентифікуються електровози ДС 3 і 2ЕС5К за період $T = 20 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ та за вхідними даними напруги $u(t)$ та струму $i(t)$.

Останнє у повній мірі відповідає суті методу ідентифікації параметрів динамічної системи в режимі її нормального функціонування.

Наукова новизна та практична значимість

Полягає, по-перше, у розробці нового методу ідентифікації. По-друге, у можливості замінити будь-якого пристрою електричної тяги RL -двополюсниками. І, нарешті, у тому, що запропонований метод дозволяє шляхом уточнення апроксимації вхідних і вихідних напруг і струмів отримувати найбільш точні значення параметрів R і L ідентифікаційного двополюсника.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

Розроблений метод дозволяє оцінювати в масштабі реального часу параметри пристроїв в систем електричного тяги, що робить його застосовуваним при моделюванні перехідних

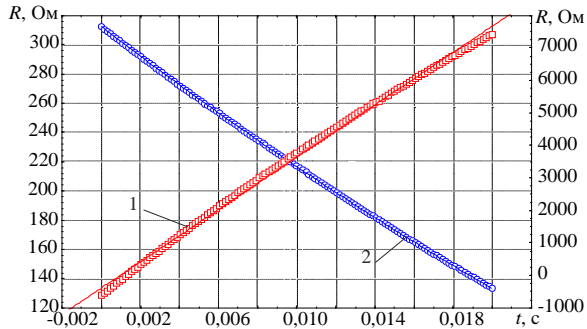


Рис. 5. Часові залежності активного опору R електровозу ДС 3 при 100 А – крива 1 (шкала ліворуч), при 20 А – крива 2 (шкала праворуч)

Fig. 5. Time dependence of the active resistance R of the diesel engine DS 3 at: 100 A – curve 1 (scale on the left), 20 A – curve 2, (scale on the right)

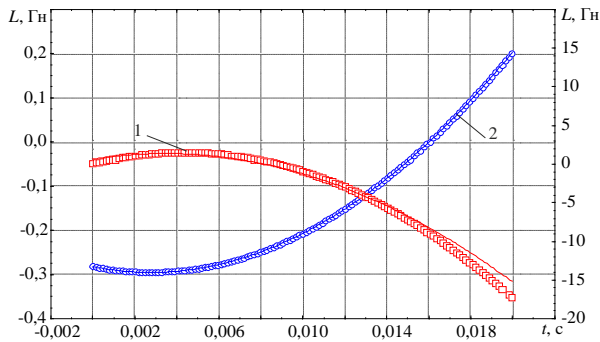


Рис. 6. Часові залежності індуктивності L електровозу ДС 3 при 100 А – крива 1 (шкала ліворуч), при 20 А – крива 2 (шкала праворуч)

Fig. 6. Time dependencies of inductance L of electric locomotive DS 3 at: 100 A – curve 1 (scale on the left), 20 A – curve 2 (scale on the right)

Висновки

1. Часові залежності активних опорів $R(t)$ обох електровозів у діапазоні $t = 0 \dots 20 \cdot 10^{-3}$ с змінюються лінійно, незалежно від степеня поліномів $u(t)$ та $i(t)$, прийнятого вигляду степеневого ряду $R(t)$ та навантаження I .

Це пояснюється тим, що третій доданок в $R(t)$, тобто $R_2 t^2$, у варіанті 2 на два порядки менший, ніж $R_1 t$, оскільки, не дивлячись на

електромагнітних процесів, які виникають при роботі досліджуваної системи в аварійних режимах.

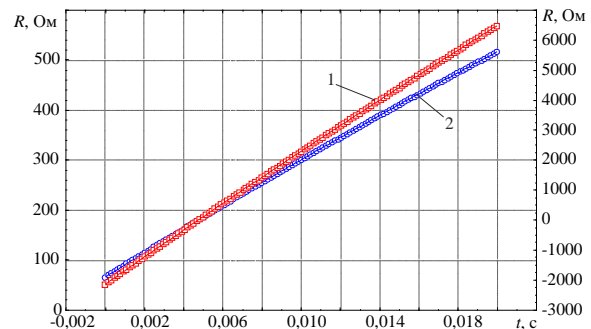


Рис. 7. Часові залежності активного опору R електровозу 2ЕС5К при 100 А – крива 1 (шкала ліворуч), при 20 А – крива 2 (шкала праворуч)

Fig. 7. Time dependences of the active resistance R of the electric motor 2ES5K at: 100 A – curve 1, scale on the left, 20 A – curve 2, scale on the right

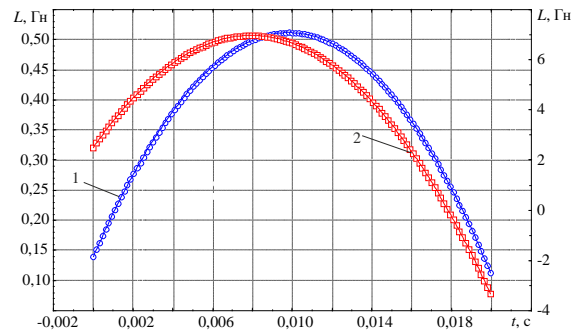


Рис. 8. Часові залежності індуктивності L електровозу 2ЕС5К при 100 А – крива 1 (шкала ліворуч), при 20 А – крива 2 (шкала праворуч)

Fig. 8. Time dependencies of inductance L of electric car 2ES5K at: 100 A – curve 1 (scale on the left), 20 A – curve 2 (scale on the right)

великі значення коефіцієнтів R_2 , він множить-ся на 10^{-6} . До того ж, R_1 має велике значення, і тому доданок $R_1 t$ суттєво перевищує $R_2 t^2$.

2. Дещо інша закономірність зміни $L(t)$. Виходячи зі значень коефіцієнтів L_1 і L_2 у варіанті 2, доданок $L_1 t$ перевищує $L_2 t^2$ десь приблизно в 8...10 разів, і тому нелінійний доданок $L_2 t^2$ робить свій внесок в $L(t)$ – саме тому ця залежність має загальний нелінійний вигляд.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

3. Ділянки з від'ємною індуктивністю в кривій $L(t)$ для електровоза ДС 3 пояснюються відстаючим кутом зсуву фаз φ , тобто тим, що вхідна напруга відстає від струму (про що свідчать відповідні осцилограми). Як відомо, від'ємній індуктивності еквівалентна певна ем-

ність. У свою чергу, емнісний характер електровоза ДС 3, як пасивного двополосника, можна пояснити певними функціональними процесами, що протікають в чотириквadrантному перетворювачу 4gs цього електровозу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев, В. Е. Методы идентификации / В. Е. Беляев, Н. В. Гудкова, Н. А. Куликовская. – Таганрог : Изд-во Технолог. ин-та ЮФУ, 2010. – 235 с.
2. Бойков, И. В. Параметрическая идентификация линейных динамических систем с распределенными параметрами / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Метрология. – 2014. – № 7. – С. 13–23.
3. Костін, М. О. Теоретичні основи електротехніки : у 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпропетровськ : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2006. – Т. I. – 336 с.
4. Мельничук, С. В. Метод структурно-параметрической идентификации многосвязных систем по частотным характеристикам / С. В. Мельничук // Кибернетика и вычислительная техника. – 2015. – Вып. 181. – С. 66–80.
5. Міщенко, Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 19–28.
6. Міщенко, Т. М. Теоретичні аспекти та методи ідентифікації параметрів пристроїв системи електричної тяги. Метод циклічної вольт-амперної характеристики / Т. М. Міщенко // Наука та прогрес транспорту. – 2013. – № 1 (43). – С. 119–125. doi: 10.15802/stp2013/9584.
7. Тиховод, С. М. Метод численного расчета переходных процессов в электрических цепях и его схемная интерпретация / С. М. Тиховод, Н. А. Костин // Наук. вісн. НГУ. – 2013. – № 5. – С. 85–92.
8. Тонкаль, В. Е. Баланс энергий в электрических цепях / В. Е. Тонкаль, В. А. Новосельцев, С. П. Денисюк. – Київ : Наук. думка, 1992. – 312 с.
9. Шефер, О. В. Сучасний метод ідентифікації нелінійних сигналів радіотехнічних систем / О. В. Шефер // Системи озброєння і військова техніка. – 2017. – № 1 (49). – С. 185–189.
10. A novel single-phase-to-ground fault identification and isolation strategy in wind farm collector line / N. Jin, J. Xing, Y. Liu, Z. Li, X. Lin // Intern. Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2018. – Vol. 94. – P. 15–26. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.06.031.
11. Detection method for single-pole-grounded faulty feeder based on parameter identification in MVDC distribution grids / G. Song, J. Luo, S. Gao, X. Wang, K. Tassawar // Intern. Journal of Electrical Power and Energy System. – 2018. – Vol. 97. – P. 85–92. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.039.
12. Eykhoff, P. Trends and progress in system identification / P. Eykhoff. – Oxford : Pergamon Press, 1981. – 418 p.
13. Kostin, N. Correlation theory of casual processes in electrical power problems for systems of electric transport / N. Kostin, T. Mishchenko, L. Shumikhina // Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE) : Proc. of the 16th Intern. Workshop Conference (September 2–5, 2015). – Lviv, 2015. – P. 84–87.
14. Kostin, N. Stochastic Electromagnetic Processes in Power Circuits of Electric Locomotive at a Sharp Change of Voltage on a Current Collector / N. Kostin, T. Mishchenko, O. Reutskova // Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe : 7th Intern. Conf. (29.09–01.10.2005). – Warsaw, 2005. – P. 227–232.
15. Spirić, J. V. Identification of suspicious electricity customers / J. V. Spirić, S. S. Stanković, M. B. Dočić // Intern. Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – Vol. 95. – P. 635–643. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.09.019.

Т. Н. МИЩЕНКО^{1*}

^{1*}Каф. «Интеллектуальные системы электроснабжения», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (099) 136 96 25, эл. почта mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ТЯГИ МЕТОДОМ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Цель. Научная работа предусматривает разработку и обоснование нового метода параметрической идентификации устройств электрической тяги, основанного на системе ортогональных функций, а именно – на основе временных степенных рядов. **Методика.** Для решения поставленной задачи используются: теория степенных рядов; основные законы теоретической электротехники, элементы спектрального анализа периодических и непериодических несинусоидальных функций электрических величин напряжения и тока; матричные методы решения системы алгебраических уравнений. **Результаты.** Разработан новый метод временных степенных рядов, который может использоваться для идентификации устройств, как системы тягового электроснабжения, так и электроподвижного состава. Метод основан на составлении интегро-дифференциальных уравнений электромагнитного состояния исследуемой электротехнической системы. Заданные напряжение и ток в указанных уравнениях аппроксимированы степенными рядами, в которые входят искомые параметры электрической цепи системы в виде коэффициентов. Пользуясь разработанным методом, в работе идентифицированы электровагоны переменного тока ДСЗ и 2ЕС5К. Определены их параметры R и L , изменяющиеся во времени на протяжении периода приложенного синусоидального напряжения. Построены и проанализированы временные зависимости $R(t)$ и $L(t)$. Дано объяснение для участков с отрицательной индуктивностью. Показано, что указанные электровагоны могут быть идентифицированы пассивным двухполюсником с параметрическими резистивным и индуктивным элементами. **Научная новизна.** Инновационность работы заключается, во-первых, в разработке нового метода идентификации, во-вторых, в возможности замены любого устройства электрической тяги параметрами RL – двухполюсника. И, наконец, в том, что предложенный метод позволяет путем уточнения аппроксимации входных и выходных напряжений и токов получать наиболее точные значения параметров R и L идентификационного двухполюсника. **Практическая значимость.** Разработанный метод позволяет оценивать в масштабе реального времени параметры устройств систем электрической тяги, что способствует его применению при моделировании переходных электромагнитных процессов, возникающих при работе исследуемой системы в аварийных режимах.

Ключевые слова: идентификация; степенные ряды; электровагон; индуктивность; резистор; метод; напряжение; ток; временные зависимости

Т. М. MISHCHENKO^{1*}

^{1*}Dep. «Intelligent Power Supply Systems», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (099) 136 96 25, e-mail mishchenko_tn@ukr.net, ORCID 0000-0001-6336-7350

PARAMETERS IDENTIFICATION OF THREE-PHASE TO CONTINUOUS CURRENT SYSTEMS DEVICES BY THE TIME SERIES METHOD

Purpose. The scientific work provides for the development and justification of a new method for the parametric identification of electric traction devices based on a system of orthogonal functions, namely – on the basis of time power series. **Methodology.** To solve this problem, we use: the theory of power series; basic laws of theoretical electrical engineering, elements of the spectral analysis of periodic and non-periodic non-sinusoidal functions of electrical quantities of voltage and current; matrix methods for solving a system of algebraic equations. **Findings.** A new method of time power series is developed, which can be used to identify devices both traction power systems and electric rolling stock. The method is based on the compilation of integro-differential equations of the electromagnetic state of the electrotechnical system under study. The given voltage and current in the indicated equations

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

are approximated by power series, into which the required parameters of the electric circuit of the system enter in the form of coefficients. Using the developed method, electric locomotives AC of DSC3 and 2ES5K were identified in the work. Their parameters R and L , varying in time over the period of the applied sinusoidal voltage, are determined. Time dependences $R(t)$ and $L(t)$ are constructed and analyzed. An explanation is given for the regions with negative inductance. It is shown that these electric locomotives can be identified by a passive two-terminal network with parametric resistive and inductive elements. **Originality.** Innovation of work consists, first, in development of a new method of identification, and secondly, in the possibility of replacing any device of electric traction with parameters of RL - a two-terminal network. And, finally, the fact that the proposed method makes it possible, by improving the approximation of input and output voltages and currents, to obtain the most accurate values of the parameters R and L the identification two-terminal network. **Practical value.** The developed method makes it possible to evaluate the parameters of devices of electric traction systems on a real-time scale, which facilitates its application in modeling the transient electromagnetic processes that arise during the operation of the system under study in emergency modes.

Keywords: identification; power series; electric locomotive; inductance; resistor; method; voltage; current; time dependencies

REFERENCES

1. Belyaev, V. Y., Gudkova, N. V., & Kulikovskaya, N. A. (2010). *Metody identifikatsii*. Taganrog: Izdatelstvo Tekhnologicheskogo instituta YuFU. (in Russian)
2. Boykov, I. V., & Krivulin, N. P. (2014). Parametricheskaya identifikatsiya lineynykh dinamicheskikh sistem s raspredelennymi parametrami. *Metrologiya*, 7, 13-23. (in Russian)
3. Kostin, M. O., & Sheikina, O. H. (2006). *Teoretychni osnovy elektrotekhniki: U trokh tomakh* (Vol. 1). Dnipropetrovsk: Vydavnytstvo DNUZT. (in Ukrainian)
4. Melnychuk, S. V. (2015). Method of Structural Parametric Multivariable System Identification Using Frequency Characteristics. *Cybernetics and Computer Engineering*, 181, 66-80. (in Russian)
5. Mishchenko, T. M. (2014). The prospects of the technical solutions and modeling systems of electric traction in high-speed trains. *Electrical Engineering and Power Engineering*, 1, 19-28. (in Ukrainian)
6. Mishchenko, T. M. (2013). Theoretical aspects and methods of parameters identification of the electric traction system devices. Method of cyclic current-voltage characteristics. *Science and Transport Progress*, 1(43), 119-125. doi: 10.15802/stp2013/9584 (in Ukrainian)
7. Tikhovod, S. M., & Kostin, N. A. (2013). Metod chislennogo rascheta perekhodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh i ego skhennaya interpretatsiya. *Naukoviy visnik NGU*, 5, 85-92. (in Russian)
8. Tonkal, V. Y., Novoseltsev, V. A., & Denisyuk, S. P. (1992). *Balans energii v elektricheskikh tsepyakh*. Kiev: Naukova dumka. (in Russian)
9. Shefer, O. V. (2017). Modern method of non-linear signals radiotechnical identification. *Systems of Arms and Military Equipment*, 1(49), 185-189. (in Ukrainian)
10. Jin, N., Xing, J., Liu, Y., Li, Z., & Lin, X. (2018). A novel single-phase-to-ground fault identification and isolation strategy in wind farm collector line. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 94, 15-26. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.06.031. (in English)
11. Song, G., Luo, J., Gao, S., Wang, X., & Tassaraw, K. (2018). Detection method for single-pole-grounded faulty feeder based on parameter identification in MVDC distribution grids. *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 97, 85-92. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.039. (in English)
12. Eykhoff, P. (1981). *Trends and progress in system identification*. Oxford: Pergamon Press. (in English)
13. Kostin, N., Mishchenko, T., & Shumikhina, L. (2015). Correlation theory of casual processes in electrical power problems for systems of electric transport. *Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE): Proc. of the 16th Intern. Workshop Conference (Lviv, September 2-5)*, 84-87. (in English)
14. Kostin, N., Mishchenko, T. & Reutskova, O. (2005). Stochastic Electromagnetic Processes in Power Circuits of Electric Locomotive at a Sharp Change of Voltage on a Current Collector. *In Modern Electric Traction in Integrated XXIst Century Europe (Warsaw, 29.09-01.10. 2005): 7th Intern. Conference*, 227-232. (in English)
15. Spirić, J. V., Stanković, S. S., & Dočić, M. B. (2018). Identification of suspicious electricity customers. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 95, 635-643. doi: 10.1016/j.ijepes.2017.09.019. (in English)

Стаття рекомендована до публікації д. т. н., проф. М. О. Костіним (Україна)

Надійшла до редколегії: 05.12.2017

Прийнята до друку: 15.03.2018